

10.11.99

09/719158

日本国特許庁

PATENT OFFICE
JAPANESE GOVERNMENT

EKU

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出願年月日

Date of Application:

1999年 4月12日

REC'D 06 JAN 2000

出願番号

Application Number:

平成11年特許願第104600号

WIPO PCT

出願人

Applicant(s):

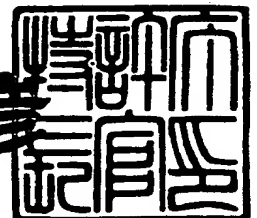
三菱電機株式会社

**PRIORITY
DOCUMENT**
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

1999年12月17日

特許庁長官
Commissioner,
Patent Office

近藤隆彦



出証番号 出証特平11-3087703

【書類名】 特許願

【整理番号】 516215JP01

【提出日】 平成11年 4月12日

【あて先】 特許庁長官殿

【国際特許分類】 G02F 1/35
G02F 3/00

【発明者】

 【住所又は居所】 東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三菱電機株式会社
社内

 【氏名】 竹内 繁樹

【特許出願人】

 【識別番号】 000006013

 【氏名又は名称】 三菱電機株式会社

【代理人】

 【識別番号】 100065226

 【弁理士】

 【氏名又は名称】 朝日奈 宗太

 【電話番号】 06-6943-8922

【選任した代理人】

 【識別番号】 100098257

 【弁理士】

 【氏名又は名称】 佐木 啓二

【手数料の表示】

 【予納台帳番号】 001627

 【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

 【物件名】 明細書 1

 【物件名】 図面 1

 【物件名】 要約書 1

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 光子数状態発生装置

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 シグナル光子とアイドラー光子からなる発生時刻に相関をもつ光子対を発生する光子対源、アイドラー光子の光子数を検出する光子数検出器、光子数検出器からの光子数の情報に応じてゲート装置をコントロールするコントロール装置、および、シグナル光子の射出を制御するゲート装置を備えることを特徴とする、光子数状態発生装置。

【請求項 2】 光子対を発生する光子対源として、ポンプ光光源と、ポンプ光光源からのポンプ光が入射する非線型光学媒質を備えることを特徴とする、請求項 1 記載の光子数状態発生装置。

【請求項 3】 ポンプ光が入射する非線型光学媒質として、ポンプ光と、非線型光学媒質の光学軸のなす角度が、そのチューニングカーブがある特定の単一波長 a に対応する直線に接するような角度に設定された非線型光学結晶を備えることを特徴とする、請求項 2 記載の光子数状態発生装置。

【請求項 4】 ポンプ光が入射する非線型光学媒質として、ポンプ光と、非線型光学媒質の光学軸のなす角度が、そのチューニングカーブがある特定の波長 a 、 b に対応する直線に接するような角度に設定された非線型光学結晶を備えることを特徴とする、請求項 2 記載の光子数状態発生装置。

【請求項 5】 ポンプ光が入射する非線型光学媒質として、導波路型の非線型光学媒質を備えることを特徴とする、請求項 2 記載の光子数状態発生装置。

【請求項 6】 ポンプ光が入射する非線型光学媒質として、擬似位相整合型の非線型光学媒質を備えることを特徴とする、請求項 2 または 5 に記載の光子数状態発生装置。

【請求項 7】 光子数検出器からの光子数の情報に応じてゲート装置をコントロールするコントロール装置に、光子数検出器からの光子数の情報が一定の範囲のものを分別する分別部を備えることを特徴とする、請求項 1 から 6 のいずれかに記載の光子数状態発生装置。

【請求項 8】 入射光子数に応じて出力パルスの高さの変化する信号を出力

する光子数検出器を備え、コントロール装置に、光子数検出器からの出力パルスの高さがある一定範囲のものを分別する波高分別部を備えることを特徴とする、請求項 1 から 6 のいずれかに記載の光子数状態発生装置。

【請求項 9】 光子数検出器からの光子数の情報が、光子数検出器に入射した光子数が 1 つである場合を分別する分別部を備えることを特徴とする、請求項 1 から 6 のいずれかに記載の光子数状態発生装置。

【請求項 10】 光子数検出器からの出力パルスの高さが、光子数検出器に入射した光子数が 1 つである場合の高さに相当するものを分別する波高分別部を備えることを特徴とする、請求項 1 から 6 のいずれかに記載の光子数状態発生装置。

【請求項 11】 コントロール装置にクロック発生部および、そのクロックによって規定される一定時間内に特定の回数を下回る回数のみゲートを開閉する開閉回数判定部を備えることを特徴とする、請求項 7 から 10 のいずれかに記載の光子数状態発生装置。

【請求項 12】 コントロール装置にクロック発生部および、そのクロックによって規定される一定時間内に、最初の光子数検出器からの信号に対してのみゲートを開閉する開閉回数判定部を備えることを特徴とする請求項 7 から 10 のいずれかに記載の光子数状態発生装置。

【請求項 13】 アイドラー光子の射出を制御するゲート装置として、シャッターを複数備えることを特徴とする、請求項 1 から 12 のいずれかに記載の光子数状態発生装置。

【請求項 14】 光子対から発生したアイドラー光子を、その光子の射出を制御するゲート装置に到達させる光ファイバーを備えることを特徴とする、請求項 1 から 13 のいずれかに記載の光子数状態発生装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、発生時刻が既知である一定数の光子を発生する装置に関し、更には既知のスケジュールで一定数の光子を発生する装置に関する。特に重要な前記一

定数は1であり、量子暗号通信などに利用できる。

【0002】

【従来の技術】

量子暗号通信システムでは、光子一つづつに情報を載せることで、量子力学的な原理により盗聴者の発見を可能にする。しかし、もし同じ情報を2つ以上の光子に載せてしまえば、盗聴者によってそれらの光子の一部を利用され、盗聴者の存在を検出できない可能性がある。このように、理想的には最大でも1つの光子しか含まないパルスを利用する必要がある。このようなパルスとしては、1パルスあたりの光子の平均数 μ を約0.1になるように、レーザー光源からの光を減衰器によって減衰することが一般に行われている。このようにすることで、2つ以上の光子がパルス中に含まれる確率を $1/100$ に減少できるが、しかしパルス中に1つの光子が含まれている確率も0.1程度に減少することになる。つまり、 $\mu=0.1$ の場合、10回に1度程度しか、実際に伝送が行われないことになる。

【0003】

このような方法を改善する従来の技術の一例として、特表平8-505019の、「量子暗号を使用したキー分配システム及び方法」に記載されているものについて、該発明の実施の形態中での図5に相当する、図11を用いて説明する。図11において、7は非線型光学媒質9をポンプするためのポンプ光8を発生するレーザーである。非線型光学結晶9では、ポンプ光の光子一つが確率的に2つの光子を発生するパラメトリック蛍光対が発生する。そのうちの一つの光子（ここでは、アイドラー光子5と呼ぶ）は、光検出器およびゲートコントロール装置38により検出され、検出した場合はもう一方の光子（シグナル光子6と呼ぶ）が通過するようにゲート装置4を開く。これらの従来技術では、特表平8-505019の、「量子暗号を使用したキー分配システム及び方法」の実施の形態にも記載されているように、光検出器として光電子増倍管や、逆方向電圧を越えて能動的クエンチングで用いられる半導体アバランシェフォトダイオード（以下、AQ-APD）などが用いられていた。

【0004】

しかし、従来の技術に用いられていた検出器を光子検出器としてそのまま用いていた場合には、検出器の反応時間内に複数入射した場合に、複数入射したことを検出することができなかった。たとえば、AQ-APDにおいては、光子がいくつ入射したかによらずパルスの大きさが一定になってしまうため、光子が入射したことは検出ができて、入射した光子の数に関する情報を得ることができなかった。また、光電子増倍管を用いる場合は、その量子効率 η が最大でも約20%と低く、2光子検出の効率は η の2乗となるため極めて低く(4%)、2光子以上の入射を検出することはできなかった。

【0005】

従来技術においては、これらの検出器の使用を前提としていたため、入射光子数の判定を行うような手段がなかった。

【0006】

このため、パラメトリック蛍光から検出器の反応時間内程度に連続して複数の光子が発生した場合にも、ゲートを開いてしまい、2光子の状態が射出されてしまうという問題があった。

【0007】

しかし、一方では、2光子が検出器の反応時間内程度に連続して存在するような「2光子状態」の生成などは不可能であった。

【0008】

【発明が解決しようとする課題】

以上述べたように、従来の技術においては、検出器が入射光子数を検出することができずまたその入射した光子数を判定するような手段を持たなかったため、光子対が光子検出器の反応時間内に連続して発生していたような場合にもゲートを開いてしまい、検出器の反応時間内に2つまたはそれ以上の光子が含まれるような状態が射出されてしまうという欠点があった。

【0009】

また、従来の方法においては、一つのパルス内部において複数の光子を正確に発生させることができなかった。

【0010】

またパルス内部での光子発生のタイミングを制御することはできなかった。

【0011】

この発明は、このような問題点を解消するためになされたもので、検出器の反応時間内に相関のない2つまたはそれ以上の光子が含まれることを抑制し、また、一つのパルス内部において相関を有する複数の光子を正確に発生させ、また、パルス内部での光子発生のタイミングを制御することが可能なような装置を実現することを目的とする。

【0012】

【課題を解決するための手段】

この発明に係る光子数状態発生装置は、シグナル光子とアイドラー光子からなる発生時刻に相関をもつ光子対を発生する光子対源と、アイドラー光子の光子数を検出する光子数検出器と、光子数検出器からの光子数の情報に応じてゲート装置をコントロールするコントロール装置と、シグナル光子の射出を制御するゲート装置とを設けたものである。

【0013】

また、光子対を発生する光子対源として、ポンプ光光源と、ポンプ光光源からのポンプ光が入射する非線型光学媒質を設けたものである。

【0014】

また、ポンプ光が入射する非線型光学媒質として、ポンプ光と、非線型光学媒質の光学軸のなす角度が、そのチューニングカーブがある特定の単一波長 a に対応する直線に接するような角度に設定された非線型光学結晶を設けたものである。

【0015】

また、ポンプ光が入射する非線型光学媒質として、ポンプ光と、非線型光学媒質の光学軸のなす角度が、そのチューニングカーブがある特定の2つの波長 a , b に対応する直線に接するような角度に設定された非線型光学結晶を備えたものである。

【0016】

また、ポンプ光が入射する非線型光学媒質として、導波路型の非線型光学媒質

を備えたものである。

【0017】

また、ポンプ光が入射する非線型光学媒質として、擬似位相整合型非線型光学媒質を備えたものである。

【0018】

また、光子数検出器からの光子数の情報が一定の範囲のものを分別する分別部を備えたものである。

【0019】

また、入射光子数に応じて出力パルスの高さの変化する信号を出力する光子数検出器を備え、コントロール装置に、光子数検出器からの出力パルスの高さがある一定範囲のものを分別する波高分別部を備えたものである。

【0020】

また、光子数検出器からの光子数の情報が、光子数検出器に入射した光子数が1つである場合を分別する分別部を備えたものである。

【0021】

また、光子数検出器からの出力パルスの高さが、光子数検出器に入射した光子数が1つである場合の高さに相当するものを分別する波高分別部を備えたものである。

【0022】

また、コントロール装置にクロック発生部および、そのクロックによって規定される一定時間内に特定の回数を下回る回数のみゲート装置を開閉する開閉回数判定部を備えたものである。

【0023】

また、コントロール装置にクロック発生部および、そのクロックによって規定される一定時間内に、最初の光子数検出器からの信号に対してのみゲート装置を開閉する開閉回数判定部を備えたものである。

【0024】

また、アイドラー光子の射出を制御するゲート装置に、複数のシャッターを備えたものである。

【0025】

また、光子対から発生したアイドラー光子を、その光子の射出を制御するゲート装置に到達させる光ファイバーを備えたものである。

【0026】

【作用】

この発明においては、光子源において発生した、発生時刻に相関をもつシグナル光子とアイドラー光子からなる光子対の内、光子数検出器によってアイドラー光子の光子数を検出し、光子数検出器からの光子数の情報に応じてゲート装置をコントロールすることによって、アイドラー光子に含まれる光子数を制御するものである。

【0027】

また、ポンプ光光源からのポンプ光を入射させ、非線型光学媒質によって発生する発生時刻に相関をもつ光子対をアイドラー光子とシグナル光子として用いる。

【0028】

また、ポンプ光が入射する非線型光学媒質の設置に当たり、ポンプ光と、非線型光学媒質の光学軸のなす角度を、そのチューニングカーブがある特定の単一波長 a に対応する直線に接するような角度に設定する。

【0029】

また、ポンプ光が入射する非線型光学媒質の設置に当たり、ポンプ光と、非線型光学媒質の光学軸のなす角度が、そのチューニングカーブがある特定の2つの波長 a 、 b に対応する直線に接するような角度に設定する。

【0030】

また、ポンプ光を導波路型の非線型光学媒質に入射する。

【0031】

また、ポンプ光を擬似位相整合型非線型光学媒質に入射する。

【0032】

また、光子数検出器からの光子数の情報が一定の範囲のものをコントロール装置の分別部で分別する。

【0033】

また、入射光子数に応じて出力パルスの高さの変化する信号を出力する光子数検出器からの信号を、コントロール装置に備えた波高分別部によって、出力パルスの高さがある一定範囲のものを分別する。

【0034】

また、光子数検出器からの光子数の情報が、光子数検出器に入射した光子数が1つである場合を分別する。

【0035】

また、光子数検出器からの出力パルスの高さが、光子数検出器に入射した光子数が1つである場合の高さに相当するものを分別する。

【0036】

また、コントロール装置のクロック発生部からのクロックによって規定される一定時間内に特定の回数を下回る回数のみゲート装置を開閉する。

【0037】

また、コントロール装置のクロック発生部からのクロックによって規定される一定時間内に、最初の光子数検出器からの信号に対してのみゲート装置を開閉する。

【0038】

また、アイドラー光子の光子の入射を光子検出器によって検出し、クロック発生器からのクロックによって規定される一定時間内に特定の回数を下回る回数のみシグナル光子の射出を制御するゲート装置を開閉する。

【0039】

また、アイドラー光子の射出をゲート装置の複数のシャッターによって制御する。

【0040】

また、光子対から発生したアイドラー光子を、光ファイバーを用いてその光子の射出を制御するゲート装置に到達させる。

【0041】

【発明の実施の形態】

実施の形態 1

図 1 は、この発明の一実施の形態の全体構成図である。この実施の形態では、検出器の分解時間 τ 以内に 2 光子が密集して存在しないような、単一光子状態を発生させる装置である。

【0042】

(構成の説明)

図 1 において、1 は発生時刻に相関をもつ光子対を発生する光子対源で、2 はアイドラー光子 5 を検出する光子数検出器、3 は光子数検出器からの光子数の情報に応じてゲート装置 4 をコントロールするコントロール装置である。ゲート装置 4 はシグナル光子 6 の射出を制御する。光子対源 1 は、非線型光学媒質 9 と、それをポンプするポンプ光 8 の光源 7 からなっている。非線型光学媒質 9 で発生したアイドラー光子 5 は、レンズ 15 によって、目的のアイドラー光子を選択的に透過させるフィルタ 17 を通しながら光子数検出器 2 に集光される。光子数検出器 2 からは、一度に入射する光子数に応じて波高の異なるパルスが出力される。そのパルスの波高が、入射光子数が 1 光子の時のみ、波高分別部 12 はゲート装置制御部 13 をトリガし、そのトリガによってゲート装置制御部 13 は、一定の時間ゲート装置 4 を開く。

【0043】

一方、シグナル光子 6 は、レンズ 15 によって集光され、シグナル光の波長 2λ の光子を選択的に透過するフィルタ 16 を通過しながら、光ファイバ 10 へと集光される。14 は、光ファイバへ外部からの光を効率的に入射するための、微動装置である。光ファイバ 10 は、以上のような手順によりアイドラー光子 5 が検出器 2 に入射してから、ゲート装置 4 が制御されるまでに必要な時間の間、シグナル光子 6 がゲート装置 4 に到達するのを遅延させるために用いられる。

【0044】

(光子対発生器の説明)

非線型光学媒質 9 では、ダウンコンバージョンによってポンプ光 8 の波長 λ の 2 倍の波長 2λ をもつアイドラー光子 5 とシグナル光子 6 が発生する。本実施の形態では、ポンプ光源 7 として 351.1 nm の波長をもつアルゴンレーザーを用いている。このとき、アイドラー光子 5 とシグナル光子 6 は、互いに発生する

光子のエネルギーの和が、351.1 nmの波長の光子のエネルギーに等しい対、つまりそれぞれ702.2 nmの波長の光子としてそれぞれ発生する。

【0045】

特願平9-353078の「光子ビーム発生装置」に詳しく記載されているように、非線型光学媒質の光学軸を、ポンプ光に対してある特定の角度に設定することにより、発生するアイドラ光子5とシグナル光子6を、ビーム状に、かつ、高効率で発生させることが可能である。図2に、 β -Barium-Boron-Oxide (BBO) 結晶の光学軸が、ポンプ光に対して50.4度の角度に設定されている場合のチューニングカーブを示す。図2において、横軸は発生している光子の波長を、縦軸は、ポンプ光の入射方向に対する光子の出射方向を示している。図に見られるように2つのチューニングカーブが波長702.2 nmに対応する直線に接している。この条件においては、それぞれ波長702.2 nmの蛍光対がそれぞれプラス3度とマイナス3度の方向にビーム状に射出される。このような非線型光学媒質を用いることにより、ポンプ光の入射パワーに対して効率よく光子対を発生しており、結果として同等のレートで単一光子を発生する場合に、装置の消費電力を低く押さえることができる。

【0046】

ここでは発生時刻に相関をもつ光子対の発生方法としてパラメトリック蛍光対を用いたが、もちろん他の方法によって発生することも可能である。たとえば、励起状態からのカスケード放出過程などを用いることができる。

【0047】

(光子数検出器の説明)

この実施の形態では光子数検出器として、Boeing社の開発したVisual Light Photon Counter (以下VLPC) を用いている。このVLPCは、Applied Physics Letters 1999年2月15日号に掲載の、Jungsang Kim, Shigeki Takeuchi, Yoshihisa Yamamoto, and Henry H. Hogueらによる「Multi-photon Counting using Visible Light Photon Counter」と題された論文に詳しく記述されているように、高い量子効率で、いくつの光子が入射したのかを検出可能である。

【0048】

図3を用いて、この検出器に多数個の光子が入射した時の動作を説明する。図3において、横軸は時間を、縦軸はVLPCからの出力パルスを示す。また、グラフは、上からそれぞれ、(a) 1光子だけの入射、(b) 2光子の同時入射、(c) 2光子が3 nsの間隔で入射、(d) 2光子が5 nsの間隔で入射した場合の出力パルスを示している。このように、2光子同時入射時には、パルス高さが1光子入射の約2倍になっている。

【0049】

図4は、検出器に入射した光子数が1光子の場合と2光子の場合それぞれについて、パルス高さの分布を調べたものである。2光子入射は、パラメトリック蛍光対を用いて行われたが、光学的な調整の問題で、発生した光子対の光子両方をVLPCに入射できてはいない。グラフにおいて、10 mV以下の部分は、ノイズであり、37 mVを中心としたピークが1光子検出に、74 mVを中心とするピークが2光子検出に相当する。ちなみに、VLPCは、その構造上、2個以上の光子が入射した場合、その個数にほぼ比例した高さの検出パルスを出力する。

【0050】

(コントロール装置の具体的構成と説明)

光学的な調整の問題等を補正した評価では、この検出器からの波高が10 mVから56 mVの範囲だけを「1光子検出」と判断した場合、VLPCを用いた光子数検出器の1光子入射に対する量子効率75%の場合、が2光子入射にも関わらず「1光子」と判断してしまう確率は35%程度であった。分別部12では、波高分析器を用いて、このような波高の信号を光子数検出器から入射された場合のみに、ゲート装置制御部をトリガする。そのトリガに従い、ゲート装置を開閉する。ゲート装置の開いている時間は、検出器の分解時間程度が望ましく本実施の形態では2 nsから5 ns程度であることが望ましい。

【0051】

前記の2光子を1光子と誤判断する確率は、VLPCを用いた光子数検出器の量子効率をさらに高めることにより改善することができる。このような検出器では、Applied Physics Letters 1999年2月22日号に掲載の、Shigeki Takeuchi, Jungsang Kim, Yoshihisa Yamamoto, and Henry H. Hogueらによる「High q

「quantum-efficiency single-photon counting system」に記載されている様に、90%近くまで量子効率を改善することが可能であり、その場合には2光子を1光子と誤判断する確率を18%以下に押さえることが可能である。

【0052】

このような検出器を用いることにより、従来技術において、「パラメトリック蛍光から検出器の反応時間内程度で連続して複数の光子が発生し、ゲートを開いてしまい、2光子の状態が射出されてしまう」といった事象を5分の1以下に低減できた。また、従来技術においては2光子射出を避けるために1パルス当りの平均光子数を小さく（例えば0.1）していたため、通信に利用した場合もそれだけ伝送効率が低下していたが、本実施の形態によれば、1パルス当り平均1個の光子を射出することができ、伝送効率を高めることができる。

【0053】

実施の形態2

実施の形態1においては、発生するシグナル光の波長は702.2nmであったが、もちろんこの波長は、適切なポンプ光源用レーザおよび非線型光学媒質を選択することにより任意に変えることができる。例えば、光ファイバーを用いた通信に一般に用いられている、1550nm付近、1310nm付近、また800nm付近の波長を発生させることももちろん可能である。

【0054】

実施の形態1（図2）に示した光子対の発生方法は、波長が等しく角度の広がり小さい光子対ビームを得るのに適した方法であるが、別の目的に対しては、BBO結晶の光学軸方向を変えることにより、波長の異なる光子対を得ることもできる。この場合には、図2の2つのチューニングカーブはそれぞれ異なる波長に対応する直線に接する。この場合にも、光子の取り出し方向は、図2に示したチューニングカーブの放物線の頂点に相当する角度で取り出す。この条件によれば、一般に円錐状に広がる光子が一本のビームにまとまり、分布密度の高い光子ビームが得られる。

【0055】

本発明のこのようなその他の実施の形態としては、図1において、ポンプ光源

7として半導体励起Yagレーザーのアップコンバージョンレーザーを用いて532nmのポンプ光8を発生させ、シグナル光子6として1310nmの光子を、アイドラー光子5として896nmの光子を発生させる装置がある。この時、特願平9-353078の「光子ビーム発生装置」に詳しく記載されているように、非線型光学媒質の光学軸のなす角度を、そのチューニングカーブがそれぞれ1310nmと896nmで接するような角度に設定し、光子対の発生効率を高めている。また、このようにアイドラー光子の波長を可視光の波長に近い近赤外域に設定することにより、光子数検出器2の量子効率が高い状態で光子数の検出が可能になっている。

【0056】

このような構成により、光ファイバー中での伝送損失の小さい1310nm付近の光子を、検出器の分解時間 τ 以内に2光子が密集して存在しないようにして発生させることが可能になった。また、本実施の形態においては、結晶の角度を上記のように設定することにより効率よく光子対を発生させることが可能になり、また、アイドラー光子の光子数の高い検出効率を維持することが可能になっており、結果として装置の消費電力を減少することができた。

【0057】

実施の形態3

本発明のその他の実施の形態を図5に示す。この実施の形態において、7はポンプ光源、18はポンプ光を導波させる光ファイバ、19は導波路型非線型媒質、20は導波路型非線型光学媒質19から発生した蛍光対とポンプ光とを分別する導波路型フィルタ、21はポンプ光の射出口、22は蛍光対を2つの分岐に分別する導波路型フィルタである。

【0058】

この実施の形態では、パラメトリック蛍光対は導波路型非線型光学媒質19において発生する。蛍光対は、それぞれ縦、横の偏光を持っており、偏光ビームスプリッターとして動作する導波路型フィルタ22において、そのうちの一方の偏光をもつものが光子数検出器2へ、もう一方が光ファイバ10へと伝達される。

【0059】

このような構成により、装置を小型化することが可能になり、また、光学的アライメントが不要になった。

【0060】

この実施の形態では、非線型光学媒質として、導波路型非線型光学媒質 19 を用いる。日本物理学会講演概要集第 53 巻第 2 号第 2 分冊 341 ページの佐中らによる「光導波路型非線型素子による 2 光子相関現象 I」によって述べられているように、擬似位相整合型の導波路型非線型媒質では、使用するポンプ光と発生する光子が平行に発生するような条件を満たすような非線型性を、擬似位相整合により得ることが可能になる。

【0061】

これにより、ポンプ光と発生光子の波長を任意に選択することが可能になった。

【0062】

実施の形態 4

その他の実施の形態として、図 3～4 に示した実施の形態 1 における光子数検出器として、複数の光子検出器を組み合わせて構成した場合を図 6 に示す。図 6 において、23、24、25 は 50 : 50 の分割比をもつ導波路型ビームスプリッタ、26 から 29 は光子検出器である。光子検出器 26 から 29 としては、光子の入射は検出可能であるが入射した光子数は分別できないような検出器を用いても良い。たとえば、入射した光子数アバランシェフォトダイオードをガイガーモードで駆動した、例えばセイコー EG & G 製の SPCM (Single Photon Counting Module) - AQ を用いることが可能である。

【0063】

光ファイバを伝播してきた光子は、ビームスプリッタ 23 から 25 を経る間に、光子検出器 26 から 29 に対してそれぞれ 4 分の 1 の確率で入射する。このため、例えば検出器の反応時間内に 2 光子が入射した場合も、 $3/4$ の確率で 2 つの検出器が応答し、2 光子として区別することができる。

【0064】

検出器 26 から 29 からの検出信号は、そのままパラレル信号として図 3 の分

別部 12 に伝達されてもよいし、適当な形で圧縮してシリアル信号として伝達されてもよい。また、各検出器の後段に論理回路を組み込むことにより、光子数検出器と分別部 12 を一体化することも可能である。

【0065】

また、ここでは一例として検出器を 4 つ並列に用いる場合を示したが、任意の個数の検出器を用いてもよい。一般に、N 個の検出器を並列で利用し、それらの検出器に等しい確率で光子が入射するようにビームスプリッターを設置した場合、2 光子入射の検出確率は $(N-1)/N$ で与えられる。

【0066】

また、この実施の形態ではビームスプリッター 23 から 25 には、50:50 のビームスプリッターを用いたが、これは各検出器の量子効率などに応じて適当な分割率のビームスプリッターを用いてもよい。

【0067】

また、光子を並列に設けられた複数の検出器で受光する方法としては、ここではビームスプリッターを用いて光路を複数に分割する方法を用いたが、例えば受光面を隣接して設置できるような場合には、レンズ等を用いて、それら複数の光子検出器によってそれぞれ均一な検出率で検出されるようにしてもよい。

【0068】

実施の形態 5

その他の実施の形態として、図 1 の判別部 12 において、光子数検出器からの検出信号が、光子が 2 つ入射した場合に相当する成分のみを切り出すこともできる。この場合、ゲートからは、検出器の反応時間内に光子が 2 つ含まれるような状態が射出されることになる。もちろん、光子数 N 個の場合を切り出すことは可能であるし、2 つ以上の光子が含まれるような状態や、偶数個の光子数状態など任意の組みあわせを発生させることも同様に可能である。

【0069】

実施の形態 6

その他の実施の形態として、図 1 におけるゲート装置 4 にシャッターを 2 つ備えたものを図 7 に示す。図 7 において、10 はシグナル光子のゲート装置への到

達時刻を遅延させるための光ファイバ、30、31は電気光学素子、32から34は偏光板、35はノットゲート、36は遅延器、13はコントロール装置である。このとき、偏光板33および34は、偏光板32を通過した光の偏光に対して最大の透過率を持ち、それと直交する偏光をもつ光は透過しないように設定する。また、電気光学素子30と31は、与えられる制御信号の論理が1であれば偏光を90度回転し、0であれば偏光を回転しないものとする。

【0070】

ゲート装置はできるだけ、光子が存在している間のみ開の状態を保ち、それ以外の間は閉であることが望ましい。しかし、電気光学素子単体では、そのゲート時間はその電気光学素子の繰り返し応答時間によって規定される時間以下には設定できなかった。この実施の形態は、シャッターを2つ備えることにより、シャッターの繰り返し応答時間より短時間でのゲート操作を実現した。

【0071】

このゲート回路の動作を、図8を用いて説明する。図8において、横軸は時間をあらわす。一番上のグラフは、ゲート操作部に目標とする光子数の状態が到達している確率を、グラフAは、図7のA点での信号を、グラフBは同様に図7のB点での信号の状態を表す。Aはコントロール装置からの制御信号そのものと考えてよい。電気光学素子31は偏光回転子33、34との組み合わせにより論理0が入力されているときは光子を透過させ、また論理1が入力されているときは光子を遮蔽する。

【0072】

電気光学素子30も、偏光子32、33との組合せにより同様に働く。

【0073】

図8のグラフAの時刻T0における状態の様に、コントロール装置からの制御信号は常時は1に設定する。この場合、電気光学素子31によって、ゲート装置としては光子を透過させない。このとき、電気光学素子30には、ノットゲート35によって論理0が入力されており、光子を透過させる。

【0074】

コントロール装置13は、偏光を光子がゲート操作部に到達すると予測される

直前の時刻 T1 に電気光学素子 31 が開になるように、出力の論理を 1 から 0 に変化させる。このとき、遅延器 36 の働きにより、電気光学素子 30 は論理 0 のままである。この時、光子はゲート装置を透過可能になっている。この状態は遅延機によって設定された時間の間継続する。その遅延の後、T2 において電気光学素子への論理が 1 にフリップし、電気光学素子 30 部分を光子は透過できなくなる。時刻 T3 で、制御信号は再び 0 から 1 へと変化し、電気光学素子 31 は閉の状態に移り、T4 で初期状態に戻る。

【0075】

以上のような構成により、個々の電気光学素子の応答時間より短い時間だけゲート装置を開くことが可能になり、必要な光子のみを選択的に射出することが可能になった。

【0076】

実施の形態 7

この発明のその他の実施の形態を図 9 に示す。図 9 において、37 はコントロール装置に供給するクロックを発生するクロック発生部である。この実施の形態の動作を、図 10 を用いて説明する。図 10 において、横軸は時間を表す。グラフ C は図 9 の点 C において観測したクロック信号、グラフ D は図 9 の D 点において観測した、光子数検出器 12 からの信号、グラフ E はコントロール装置 13 からのゲート制御信号、グラフ F はゲート装置 4 を経たのち、光ファイバ 11 において観測される光子の分布である。

【0077】

グラフ D に見られるように、光子数検出器 2 からは、その時点での入射光子数に応じた波高をもつ信号が常に出力されている。波高分別部 12 は、一度に一つの光子の入射に対応した波高を選択する。コントロール装置 13 では、クロック立ち上がり後最初に入力される波高分別部からの信号に対してのみ、ゲート装置 4 を開く（グラフ E）。結果として、光ファイバ 11 からはグラフ F に見られるようなほぼ一定の間隔で単一の光子が射出される。

【0078】

この実施の形態においては、波高分別部 12 は光子が光子数検出器 2 の感度時

間内に1つだけの状態を選別したが、もちろん2つまたはそれ以上の光子数に対応した状態を選別することも可能である。これにより、一定間隔に近い間隔において、多光子数状態を発生させることが可能になる。発生する光子対の数を増やせば、この間隔をさらに一定に近づけることが可能である。

【0079】

実施の形態8

実施の形態7においては、一定時間間隔内に1度だけゲート装置を開いたが、一定時間間隔内にN回だけゲート装置を開くことも可能である。このようにすれば、一定時間内にN個ずつ光子を含むような状態を生成することができる。この場合も、発生する光子対の数を増やすことによって、N個の光子がある一定間隔で繰り返し発生しているような状態を生成することが可能になる。

【0080】

【発明の効果】

以上のようにこの発明においては、発生時刻に相関をもつ光子対を発生する光子対源、そのうち一方の光子を検出する光子数検出器、光子数検出器からの光子数の情報に応じてゲート装置をコントロールするコントロール装置を備えることにより、検出器の応答速度に関わらず、任意の光子数状態を発生することができる。

【0081】

また、光子対を発生する光子対源として、ポンプ光光源と、ポンプ光光源からのポンプ光が入射する非線型光学媒質を備えることにより、任意の光子数状態を効率よく発生することができる。

【0082】

また、非線型光学素子を適切に調節することにより、さらに光子数状態を効率よく発生することができる。

【0083】

また、非線型光学媒質として、導波路型の非線型光学媒質を備えることにより、光学的な調整が不要になり、取り扱いを容易にすることができる。

【0084】

また、コントロール装置にクロック発生部および、そのクロックによって規定される一定時間内に特定の回数を下回る回数のみゲートを開閉する開閉回数判定部を備えることにより、一定時間間隔で光子数状態を発生することができる。

【0085】

また、ゲート装置にシャッターを複数備えることにより、シャッター自体の繰り返し周波数よりも非常に短い時間でのゲートを実現できる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 この発明の一実施の形態の全体構成図である。

【図2】 非線型光学媒質で発生する光子の波長と放出角度の関係を示す図である。

【図3】 この発明の一実施の形態で使用する光子数検出器の、入射光子と出力信号の関係を示す図である。

【図4】 この発明の一実施の形態で使用する光子数検出器の、入射光子数と出力信号の高さの関係を示す図である。

【図5】 この発明の一実施の形態の全体構成図である。

【図6】 この発明の一実施の形態で使用する光子数検出器の構成図である。

【図7】 この発明の一実施の形態で使用するゲート装置部の構成図である。

【図8】 この発明の一実施の形態で使用するゲート装置部の動作を説明するための図である。

【図9】 この発明の一実施の形態の全体構成図である。

【図10】 この発明の一実施の形態の動作を説明するための図である。

【図11】 従来技術の一例の全体構成図である。

【符号の説明】

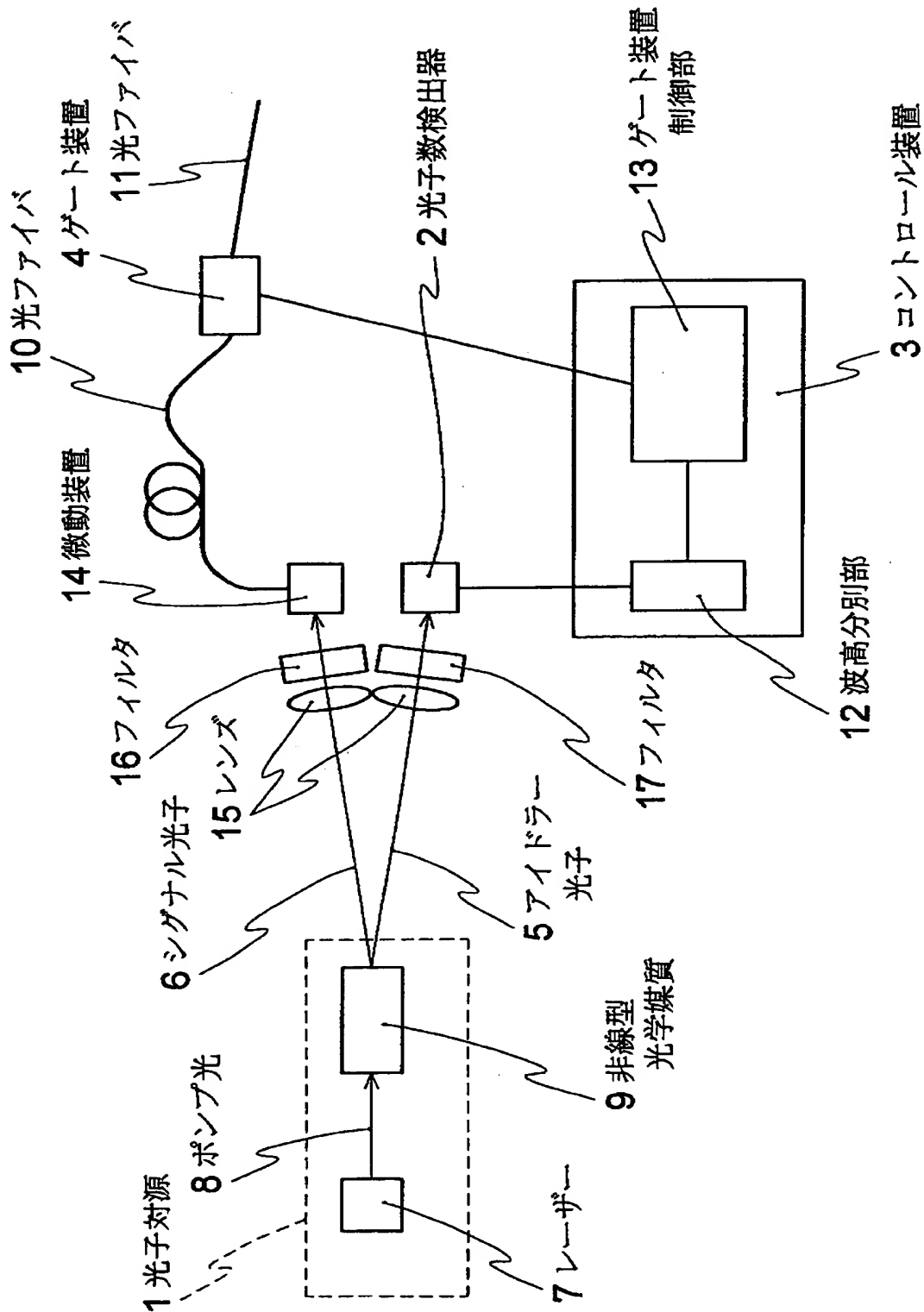
1 光子対源、2 光子数検出器、3 コントロール装置、4 ゲート装置、5 アイドラー光子、6 シグナル光子、7 レーザー、8 ポンプ光、9 非線型光学媒質、10 光ファイバ、11 光ファイバ、12 波高分別部、13 ゲート装置制御部、14 微動装置、15 レンズ、16 フィルタ、

17 フィルタ、18 光ファイバ、19 導波路型非線型光学媒質、20 導波路型フィルタ、21 射出口、22 導波路型フィルタ、23 導波路型ビームスプリッタ、24 導波路型ビームスプリッタ、25 導波路型ビームスプリッタ、26 光子検出器、27 光子検出器、28 光子検出器、29 光子検出器、30 電気光学素子、31 電気光学素子、32 偏光板、33 偏光板、34 偏光板、35 ノットゲート、36 遅延器、37 クロック発生部、38 光検出器およびゲートコントロール装置。

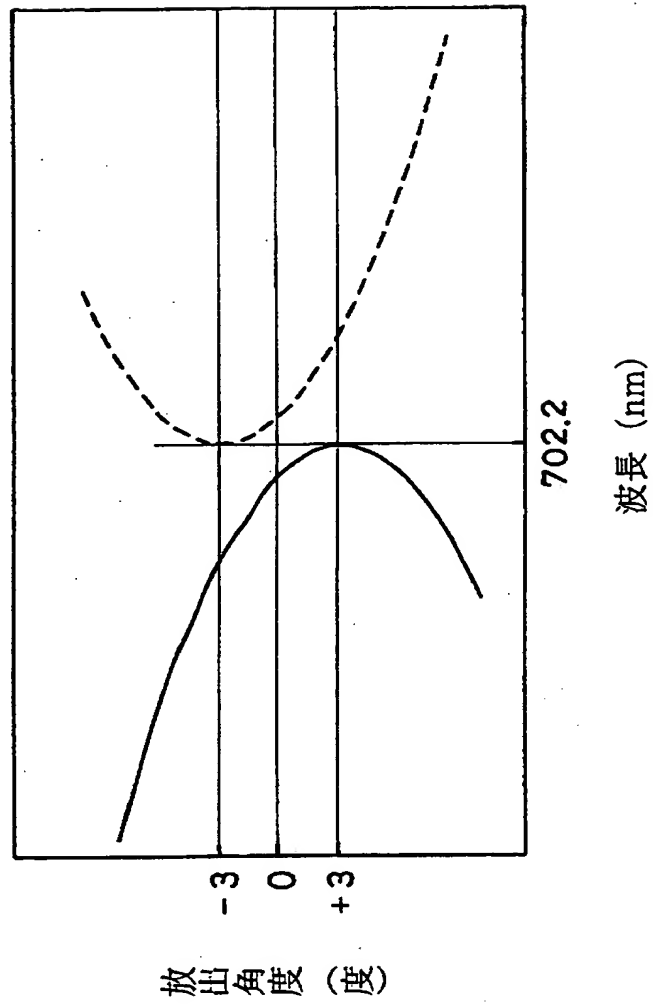
【書類名】

図面

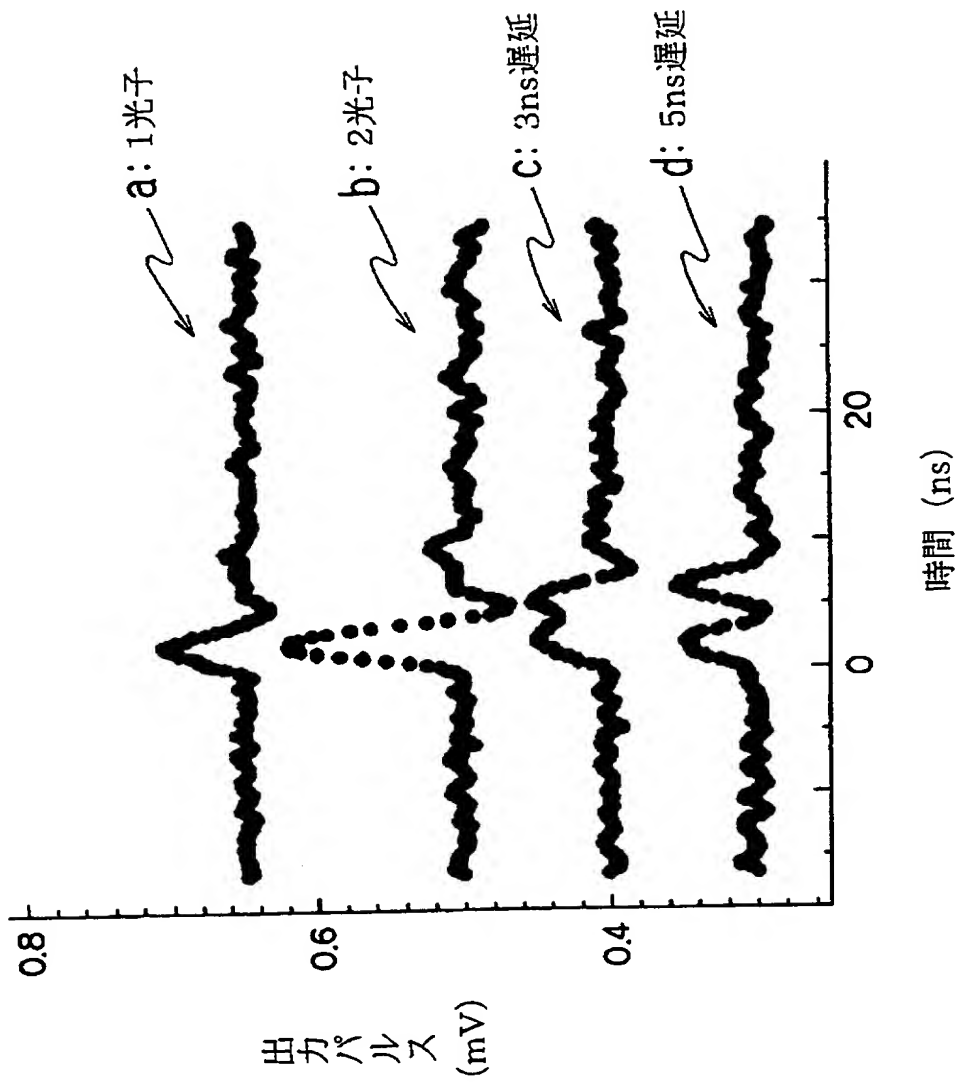
【図 1】



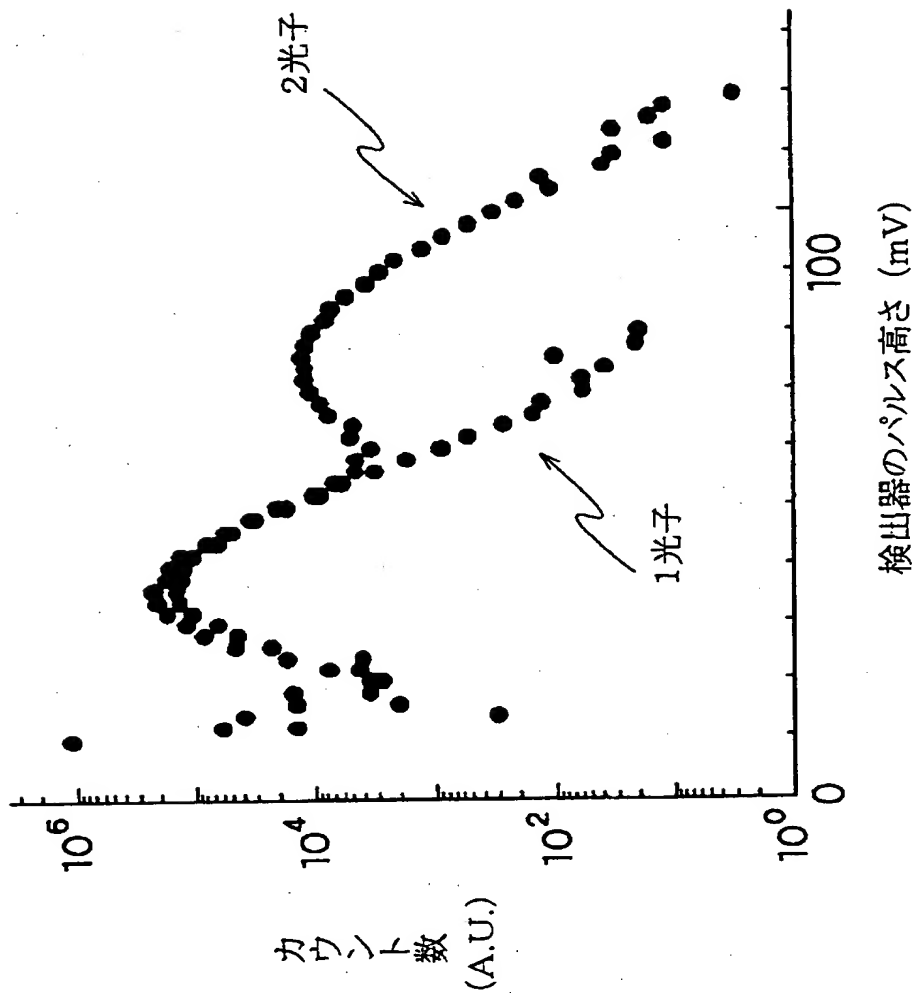
【図 2】



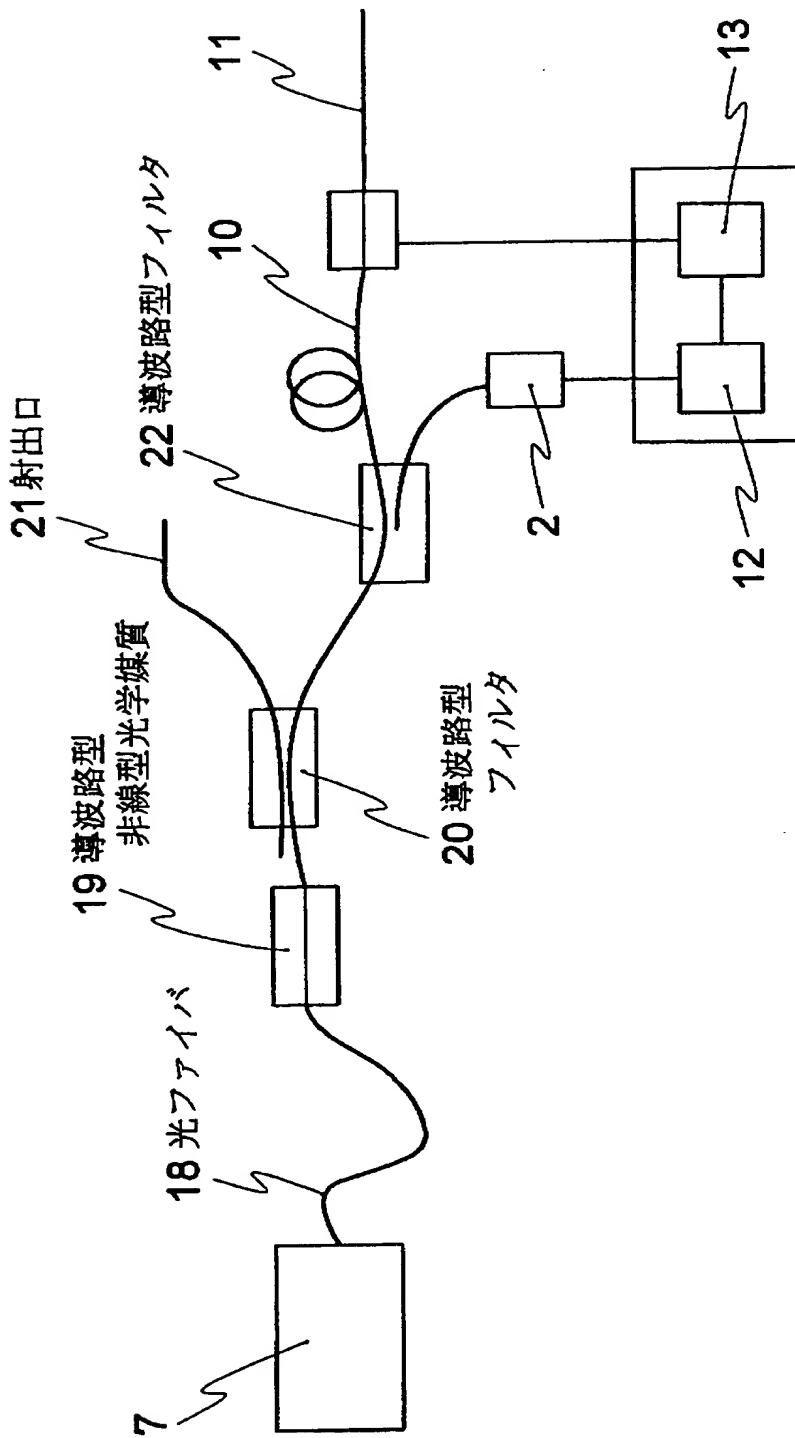
【図 3】



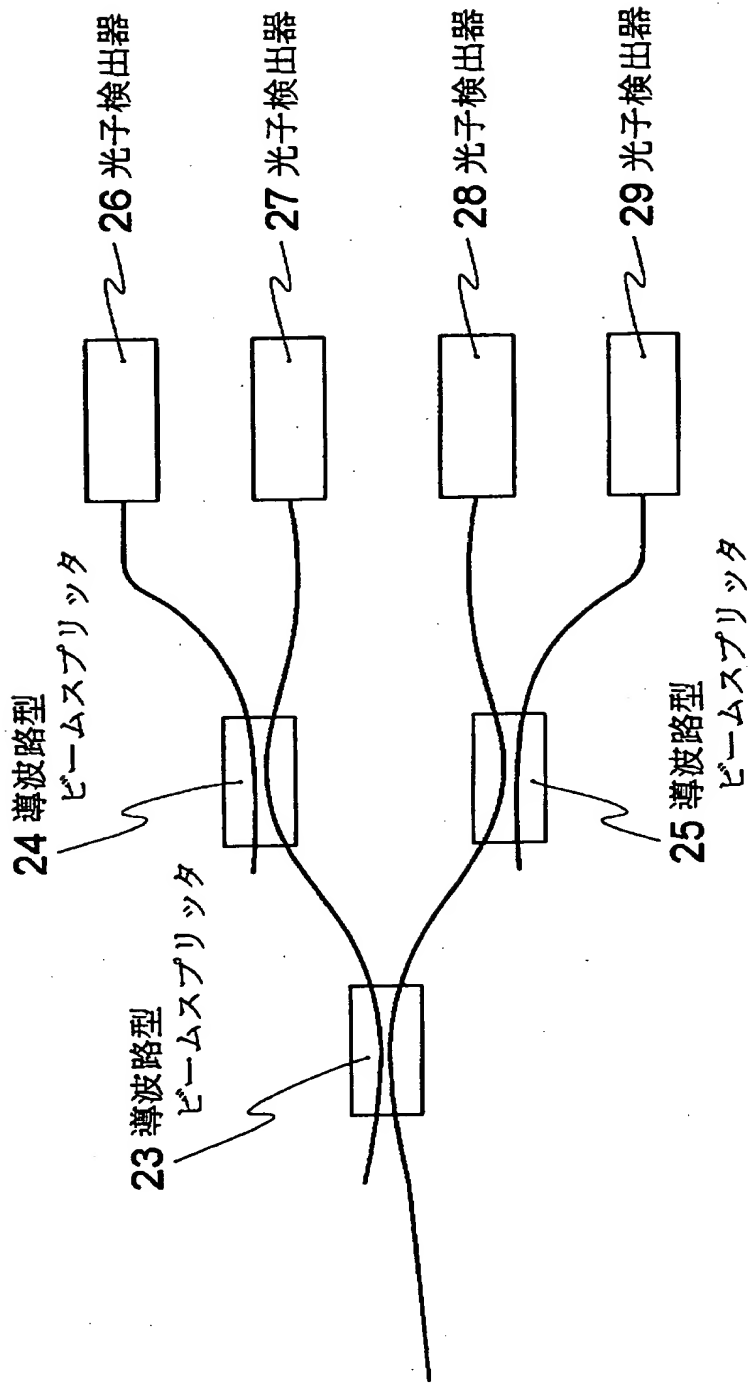
【図 4】



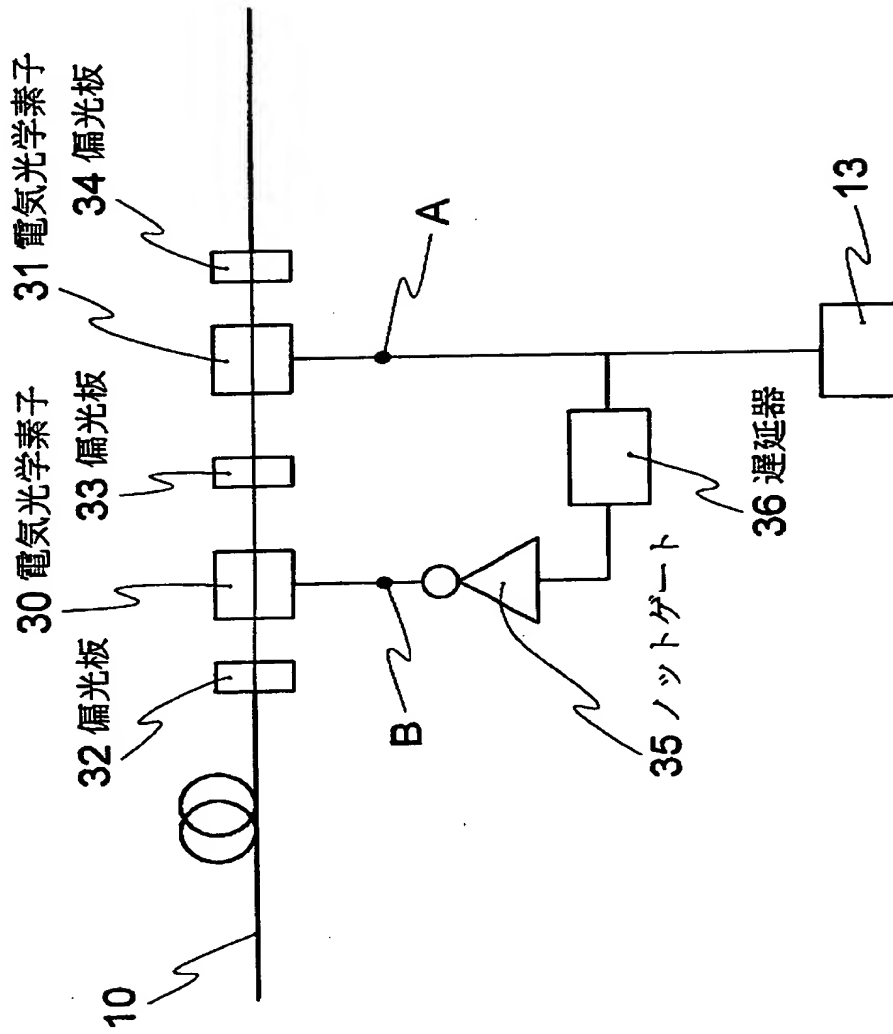
【図 5】



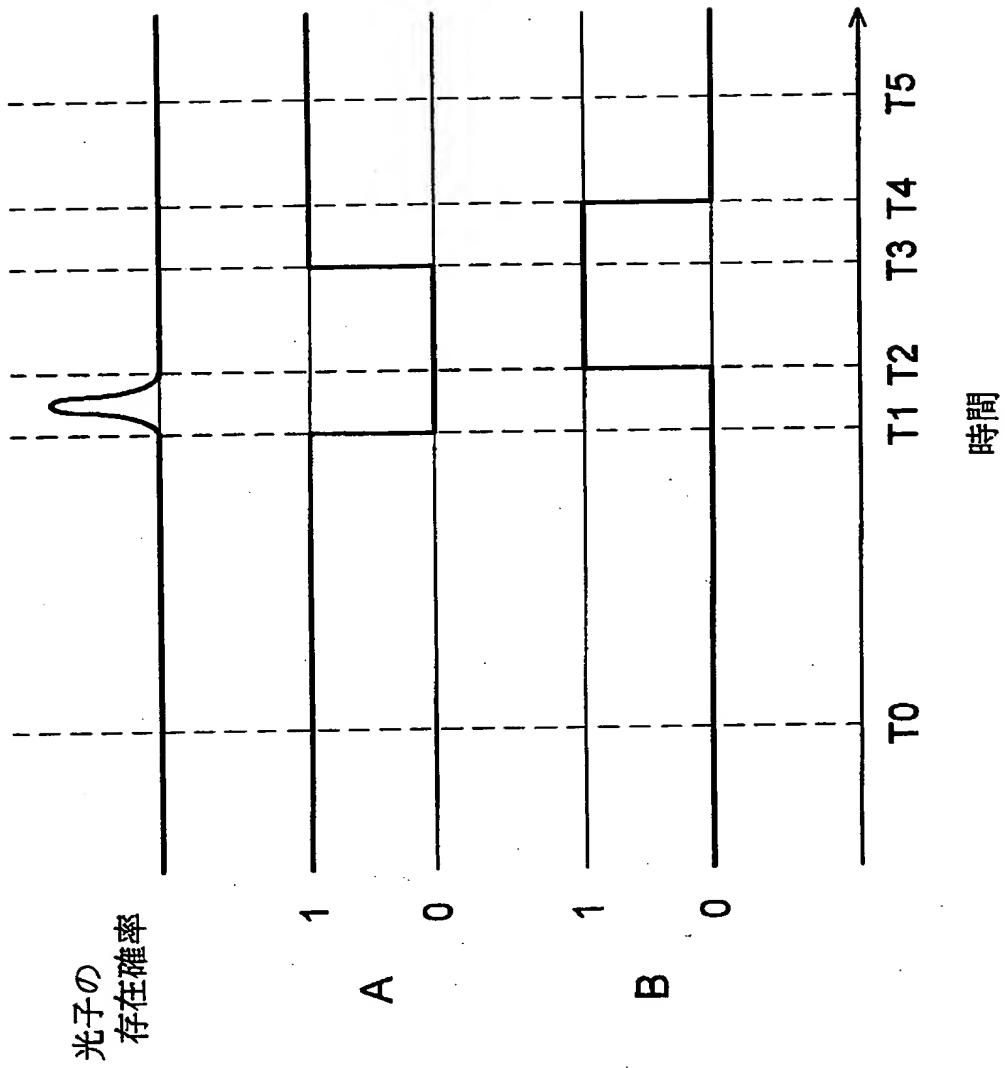
【図 6】



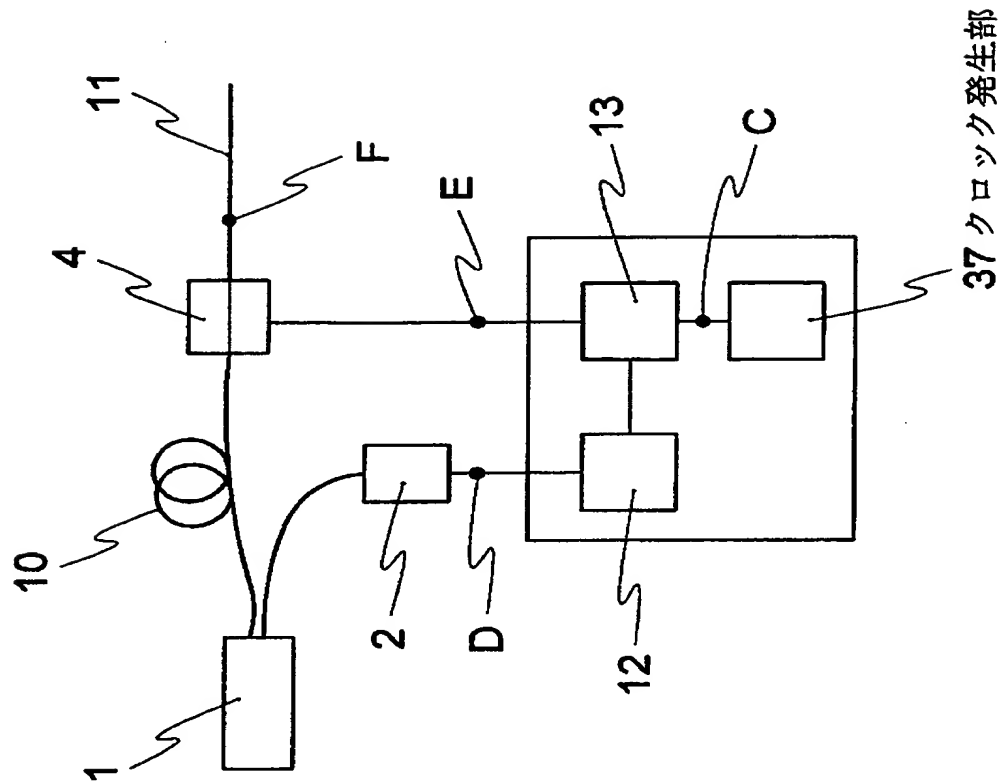
【図 7】



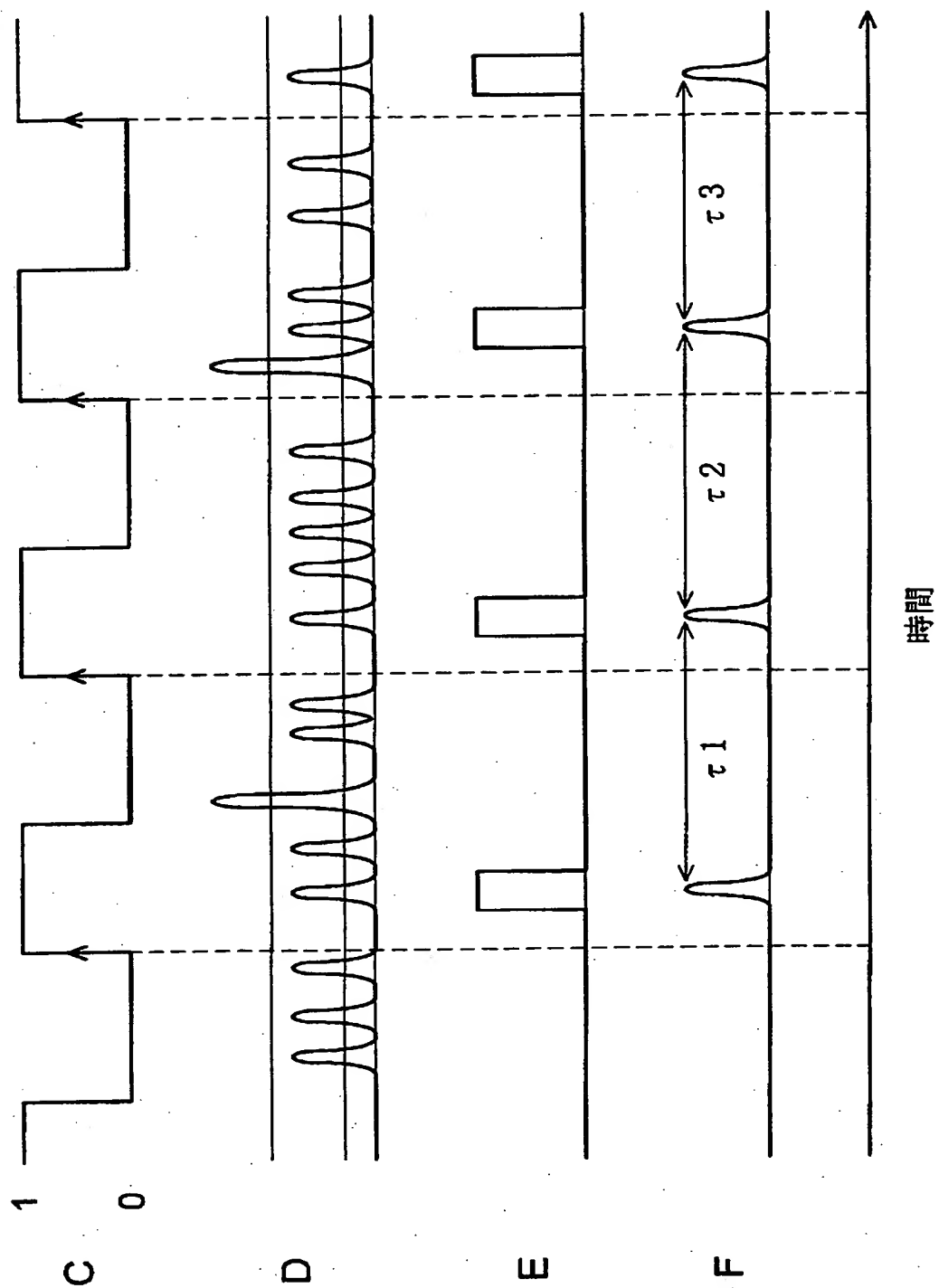
【図 8】



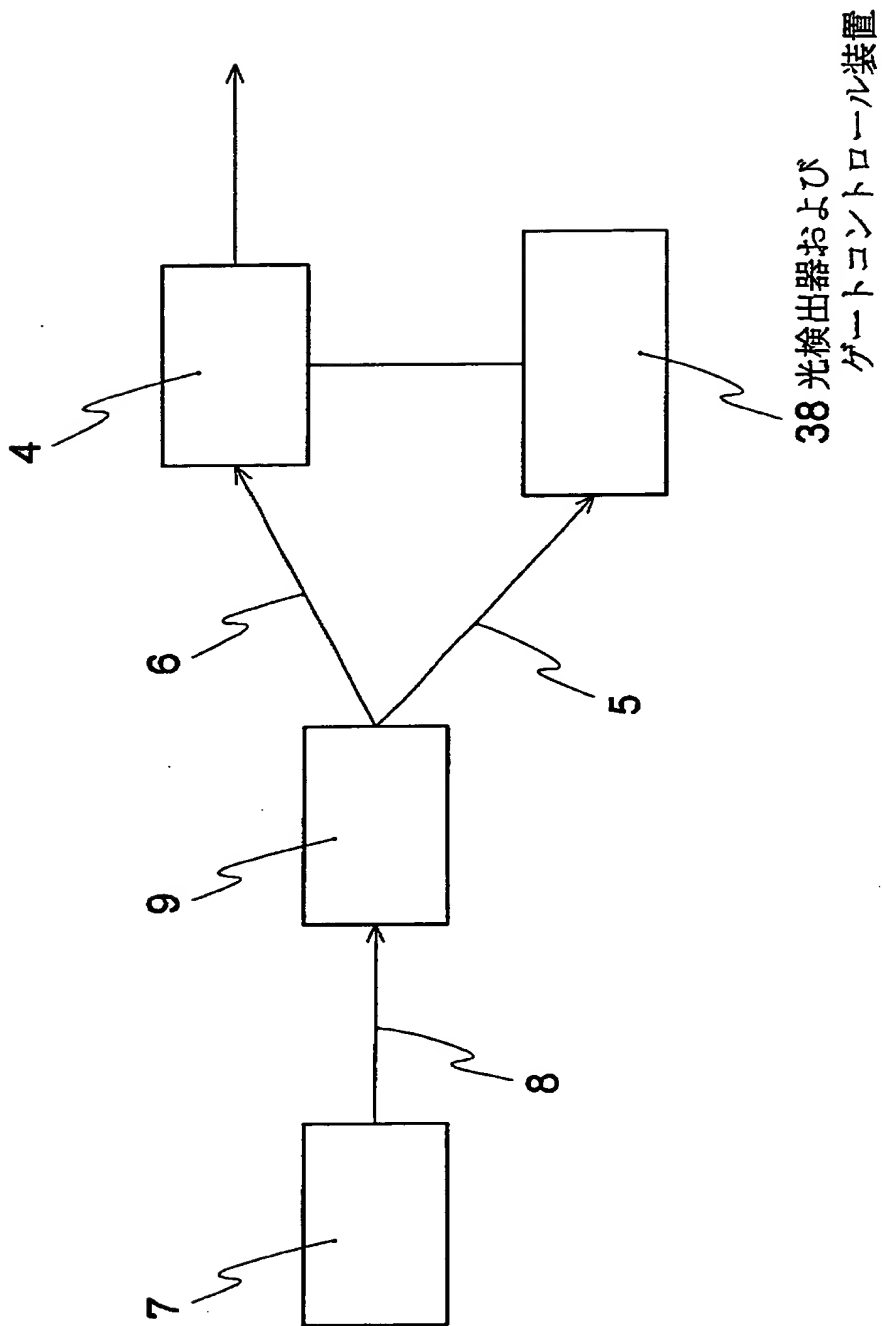
【図 9】



【図 10】



【図 11】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 発生時刻が既知である一定数の光子を発生する装置、更には既知のスケジュールで一定数の光子を発生する装置を提供する。特に重要な前記一定数は1であり、量子暗号通信などに利用できる。

【解決手段】 シグナル光子とアイドラー光子からなる発生時刻に相関をもつ光子対を発生する光子対源、アイドラー光子の光子数を検出する光子数検出器、光子数検出器からの光子数の情報に応じてゲート装置をコントロールするコントロール装置、および、シグナル光子の射出を制御するゲート装置を備えた。

【選択図】 図 1

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号

[000006013]

1. 変更年月日	1990年 8月24日
[変更理由]	新規登録
住 所	東京都千代田区丸の内2丁目2番3号
氏 名	三菱電機株式会社